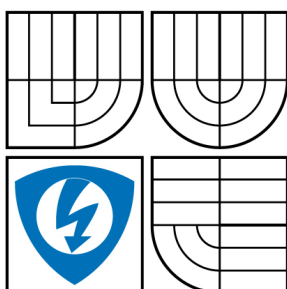




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

SPOLEHLIVOST BEZOLOVNATÉHO PÁJENÉHO SPOJE

RELIABILITY OF LEAD FREE SOLDER JOINT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN PAŠKO

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR STEJSKAL

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Martin Paško

ID: 77731

Ročník: 3

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Spolehlivost bezolovnatého pájeného spoje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou detekce dutin v pájeném spoji. Vytvořte přehled typů dutin a popište jejich vliv na spolehlivost.

Vytvořte sadu zkušebních vzorků a analyzujte dutiny v pájených spojích. Zkušební vzorky podrobte tepelnému namáhání a následně analyzujte jeho vliv na změny v pájeném spoji a proveďte vyhodnocení s ohledem na spolehlivost spoje.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 3.6.2009

Vedoucí práce: Ing. Petr Stejskal

prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Práce se zabývá tvorbou voidů v bezolovnatém pájeném spoji. V teoretické části jsou popsány typy voidů, princip vzniku, vliv na spolehlivost spoje, vliv přetavovacího profilu na tvorbu voidů a vliv povrchových úprav na tvorbu voidů. V praktické části je zkoumán vliv tepelného namáhání na tvorbu a zvětšování voidů v pájeném spoji.

Abstract

This thesis deals with voids formation in lead-free soldered joint. In theoretical part are described types of voids, voids formation, effect on join reliability, effect reflow profile on voids formation and effect of surface finish on voids formation. In practical part is investigated a effect of thermal stress on voids growth.

Klíčová slova

voidy, bezolovnatý pájený spoj, přetavovací profil, povrchové úpravy, spolehlivost, tepelné namáhání

Key words

voids, lead-free solder joint, reflow profile, surface finish, reliability, thermal stress

Bibliografická citace

PAŠKO, M. *Spolehlivost bezolovnatého pájeného spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Stejskal.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 3. 6. 2009

.....

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Stejskalovi za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na bakalářskou práci.

Obsah

1	Úvod	8
2	Teoretická část	9
2.1	Bezolovnaté pájky	10
2.1.1	Složení bezolovnatých pájek	11
2.1.2	Přehled používaných bezolovnatých slitin	12
2.1.3	Srovnání slitin SnAgCu a SnPb	13
2.2	Voidy v pájce	14
2.2.1	Macro voidy	16
2.2.2	Micro voidy	22
2.3	Voidy v mikropropojích	23
2.3.1	Vliv teplotního profilu	23
2.3.2	Vliv povrchových úprav	25
2.3.3	Další vlivy	27
3	Praktická část	30
3.1	Výroba desky a vzorků	31
3.2	Mikrovýbrusy	32
3.3	Teplotní namáhání	33
4	Závěr	38
5	Přehled použité literatury	40
6	Seznam obrázků	42
7	Seznam tabulek	42
8	Seznam grafů	43
9	Seznam příloh	44

1 Úvod

Pájený spoj je jednou z nejdůležitějších součástí elektronických zařízení. Jeho funkcí je mechanicky a vodivě připojit součástku k desce plošných spojů. Jeho spolehlivost je tedy pro zařízení velmi důležitá. Přechodem z olovnatých pájek na bezolovnaté byl pozorován zvýšený výskyt tvorby voidů (dutin) ve spoji. Přítomnost voidů může mít vliv na spolehlivost funkce ovlivňováním jeho mechanických a elektrických vlastností. Zda je tento vliv významný či nikoliv, je předmětem diskuze, převládají ale názory, že přítomnost voidů ve spoji vliv na spolehlivost má.

Tato práce je rozdělena do dvou částí. Teoretická část je zaměřena na rozbor problematiky tvoření voidů, jež se sice v olovnatých pájkách objevovaly také, ale v případě bezolovnatých pájek byl zaznamenán nárůst jejich tvorby. Cílem této části je zjistit z dostupných zdrojů co nejvíce informací o vzniku, působení na spolehlivost pájeného spoje, o vlivu různých činitelů technologického procesu na vytvořené množství voidů atd. pro vlastní prozkoumání daného problému, který je předmětem následné praktické části.

Praktická část zahrnuje celý technologický postup výroby testovacích desek, dále pak výrobu mikrovýbrusů, které jsou použity k pořízení snímků pomocí optického mikroskopu a nakonec tepelné namáhání desek a vyhodnocení vlivu tepelného namáhání na růst voidů v pájeném spoji.

2 Teoretická část

2.1 Bezolovnaté pájky

Ekologicky zaměřená legislativa od 1. 7. 2006 zamezuje používání kovů s negativním dopadem na lidské zdraví, mezi které patří i olovo. Toto nařízení, vycházející z ekologických norem (ECO) a dalších souvisejících norem (WEEE atd.), se v elektronice výrazně dotýká olovnatých pájek, jenž po dlouhou dobu patří neodmyslitelně k výrobě elektronických a elektrotechnických zařízení.

Náhrada olovnatých pájek je ve světě řešena již delší dobu, např. v Japonsku již několik let před vydanou legislativou začaly firmy přecházet na pájení bezolovnatými pájkami. V USA už v roce 1993 zavedli poplatky za používání vybraných škodlivých látek, mezi které patří i olovnaté pájky. Vzhledem k současnému rozmachu proekologického myšlení je to i v zájmu firem. Samozřejmě existují také výjimky, a to v případě vojenských či lékařských zařízení.

Vzhledem k tomu, že pájený spoj je tvořen ze 75% pájkou a zbylých 25% připadá na pájecí povrch a vývod součástky, je zřejmý význam pájky při pájení procesu a proto musí být jejímu výběru věnována nejvyšší pozornost. Bezolovnaté pájky musí proto vyhovovat těmto požadavkům [1]:

- kompatibilita s používanými zařízeními i postupy (vlnové pájení, HAL, vhodnost pro ruční pájení ve formě trubičkového drátu i použitelnost pro pájecí pastu, zejména pro no-clean aplikace)
- ekvivalentní a lepší materiálové charakteristiky než stávající slitiny
- teplota tavení $>185^{\circ}\text{C}$
- minimální rozsah plastického stavu, optimálně $4 - 15^{\circ}\text{C}$
- cena a dostupnost

Přechod na bezolovnaté pájky s sebou přinesl řadu změn a nových faktorů a bezpochyby i zásah do technologického procesu pájení. Kromě odlišných vlastností je podstatná skutečnost, že použití bezolovnatých pájek přineslo i zvýšení nákladů.

2.1.1 Složení bezolovnatých pájek

Pro bezolovnaté pájecí slitiny je většinou nutná přítomnost minimálně 60 % cínu, zbytek je doplněn většinou drahými kovy. Cena slitiny je závislá na ceně jednotlivých složek a ve většině případů je dražší než olovnaté pájky. Zásadní rozdíl mezi bezolovnatou a olovnatou pájkou je v teplotě tavení. Zatímco olovnaté pájky dosahují tekutého stavu při asi 183°C, u většiny bezolovnatých pájek je tohoto stavu dosaženo při teplotě vyšší, v rozmezí 190°C – 227°C, v závislosti na jejím složení.

Jako substituty olova v pájce se používají následující prvky [2]:

- **stříbro (Ag)** – drahý kov, který je používán i jako složka v olovnatých pájkách, pro dobré elektrické vlastnosti se používá u bezolovnatých pájek i přes svou vysokou cenu, dále také snižuje bod tání a zlepšuje smáčivost a pevnost
- **bismut (Bi)** – snižuje bod tání, smáčivost je spíše průměrná, výhodou je také cena, ale jeho použití snižuje jeho získávání jako produktu při čištění olova
- **měď (Cu)** – v elektrotechnice hojně používaný prvek, zvláště pro výrobu vodičů, má dobrou smáčivost povrchu i mechanickou pevnost, ale rozpouští se ve slitinách s vysokým obsahem cínu, a tím se ovlivňuje jakost spoje (zeslabení spoje, snížení pevnosti a zvýšení odporu)
- **indium (In)** – využívá se ke snížení bodu tání slitiny, má teplotu tavení 156°C, má dobrou smáčivost povrchu, ale mechanické vlastnosti nejsou příliš vhodné pro pájení, také cena pájek je velká, protože indium je dražší než stříbro a pro používání pájky je potřeba tohoto prvku velké množství
- **antimon (Sb)** – zvyšuje pevnost, snižuje povrchové napětí, ale je částečně toxický pro lidský organismus
- **zinek (Zn)** – nízký bod tání, nízká cena
- **nikl (Ni)** – zabraňuje odsmáčení
- **germanium (Ge)** – zabraňuje oxidaci

2.1.2 Přehled používaných bezolovnatých slitin

Tab 1: Slitiny pod 180°C [1]

Systém	Složení (hm%)	Rozsah teplot tavení (°C)
Sn-Bi	Sn-58Bi	138e
Sn-In	Sn-52In	118e
	Sn-50In	118-125
Bi-In	Bi-33In	109e

Tab 2: Slitiny 180 – 200°C [1]

Systém	Složení (hm%)	Rozsah teplot tavení (°C)
Sn-Zn	Sn-9Zn	199e
Sn-Bi-Zn	Sn-8Zn-3Bi	189-199
Sn-Bi-In	Sn-20Bi-10In	143-193

Tab 3: Slitiny 200 – 230°C [1]

Systém	Složení (hm%)	Rozsah teplot tavení (°C)
Sn-Ag	Sn-3,5Ag	221e
	Sn-2Ag	221-226
Sn-Cu	Sn-0,7Cu	227e
Sn-Ag-Bi	Sn-3,5Ag-3Bi	206-213
	Sn-7,5Bi-2Ag	207-212
Sn-Ag-Cu	Sn-3,8Ag-0,7Cu	217e
Sn-Ag-Cu-Sb	Sn-2Ag-0,8Cu-0,5Sb	216-222

2.1.3 Srovnání slitin SnAgCu a SnPb

Jako referenční bezolovnatá pájka se považuje SnAgCu (často je užívaná zkratka SAC), která má v porovnání s pájkou SnPb nejvyváženější vlastnosti. Ve světě se používají odlišná procentuální složení pájky, např. v USA $\text{SnAg}_{3,9}\text{Cu}_{0,6}$, v Japonsku $\text{SnAg}_{3,9}\text{Cu}_{0,5}$, v Evropě $\text{SnAg}_{3,8}\text{Cu}_{0,7}$ (číslo udává procentuální zastoupení prvku ve slitině).

Srovnání SAC a SnPb [2]:

- SAC požaduje vyšší přetavovací teplotu kolem 218°C , SnPb má bod tavení 183°C .
- smáčení SAC pájek je horší především z důvodu vyššího povrchového napětí, ale srovnatelných hodnot je možné dosáhnout použitím dusíkové atmosféry.
- spoje tvořené SAC pájkou jsou matné a mají drsnější povrch, což je nutné zohlednit při optické kontrole bezolovnatých spojů.
- obě pájky mají podobnou spolehlivost do 125°C , při vyšších teplotách jsou spolehlivější SAC pájky.
- SAC pájky mají vyšší pevnost v tahu, hlavně při vyšších teplotách, a za vyšších teplot větší pevnost v tlaku.
- SAC pájky jsou náchylnější k vytváření voidů nebo k tvorbě whiskerů (z důvodu vysokého obsahu cínu ve slitině).
- celková struktura je u bezolovnatých pájecích slitin složitější než u SnPb pájek. (vzhledem k použití více prvků dochází k tvorbě většího množství intermetalických sloučenin), což může mít dopad na dlouhodobé vlastnosti.

2.2 Voidy v pájce

Přechod na bezolovnaté pájky s sebou přinesl několik problémů, které se u olovnatých pájek vyskytovaly také, ale rozhodně v menší míře. Jedním z nich je zvýšená tvorba voidů - dutin (dále v textu voidy) ve spoji. Následkem jejich zvýšené tvorby může docházet k problémům se spolehlivostí pájených spojů a tím i celého zařízení, zejména při tepelném namáhání nebo v případě, že zařízení bude vystaveno vibracím. Dutiny byly zaznamenány u všech typů spojů. Důvodů proč se voidy u bezolovnatých pájek tvoří více je několik [3]:

- větší povrchové napětí u bezolovnatých pájek,
- vyšší přetavovací teploty,
- snížená rychlost smáčení,
- častější použití agresivnějších tavidel ve slitinách.

Akceptovatelná velikost voidů ve spoji je sice určena, ale výrobci si případně mohou sami podle potřeby jejich vlastního výrobku určit jaké množství a velikost voidů je vhodné. Norma IPC-A-610D [4] udává že:

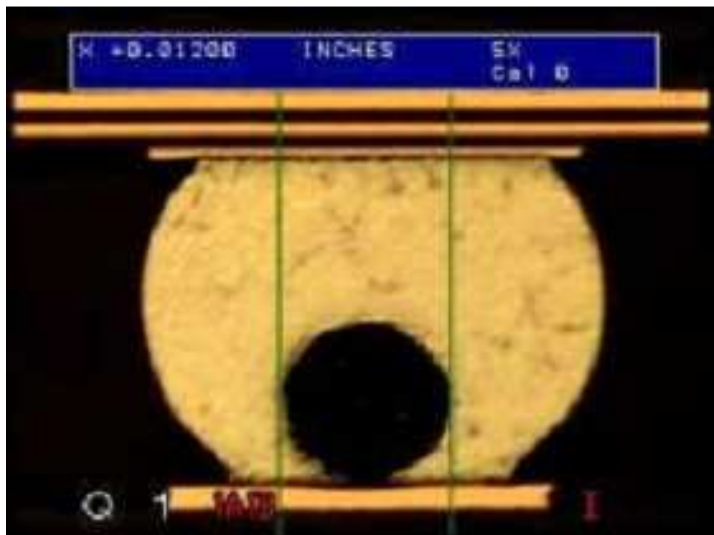
- akceptovatelné množství velikosti voidu je 25% a méně u snímků pořízených elektronovým mikroskopem,
- více než 25% velikosti je označeno jako defekt.

Dále existuje norma pro výskyt voidů v BGA spojích, která rozšiřuje normu IPC-A610D a je popsána v normě IPC 7095 (Tab 4).

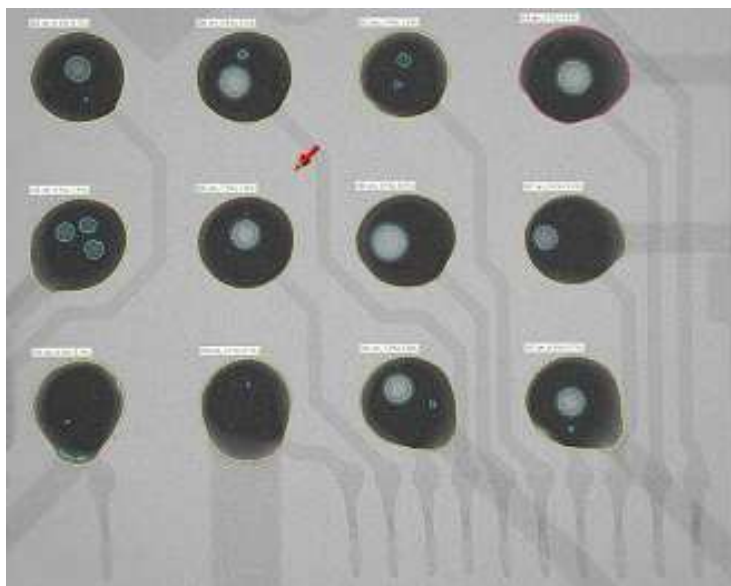
Tab 4: Kritéria pro voidy v BGA kuličce [5]

Umístění voidu	Třída I	Třída II	Třída III
Void v pájce	60% průměru = 35% oblasti	42% průměru = 20,25% oblasti	30% průměru = 9% oblasti
Void na rozhraní pájka/substrát	50% průměru = 25% oblasti	25% průměru = 12,25% oblasti	20% průměru = 4% oblasti

Zjišťování přítomnosti voidů ve spoji se provádí dvěma způsoby. První způsob je příčný řez, což je destruktivní metoda, která ale na rozdíl od druhé metody odhalí přesnou polohu voidu ve spoji (Obr 1). Druhou metodou je kontrola pájených spojů pomocí rentgenu (Obr 2), jenž nedestruktivně odhalí přítomnost voidů a zároveň lze pomocí příslušného programu určit množství voidů a také jejich velikost.



Obr 1: Snímek příčného řezu BGA spoje, který odhaluje přítomnost voidu ve spoji [6]



Obr 2: Kontrola pájených spojů rentgenem [7]

V pájeném spoji můžeme nalézt několik typů voidů, které se liší velikostí a částečně i vznikem. Jedná se o tyto typy [6]:

- **Macro voidy,**
- **Micro voidy.**

Dalším typem jsou voidy v mikropropojích, které ovšem vznikají z jiného důvodu než zmíněné dva druhy, proto jsou zařazeny mimo tuto kapitolu.

2.2.1 Macro voidy

Vznik makro voidů (Obr. 1 a 2) je způsoben těkavými složkami pájky, které se vypařují během pájení a které nejsou schopny z roztaveného kovu uniknout před jeho zatuhnutím. Zdrojem těchto látek jsou rozpouštědla a tavidla, která jsou přítomna v pájecí pastě, a jež mají zlepšovat vlastnosti pájky. Na vznik voidů má vliv spousta faktorů, z nichž nejvýznamnější je, jak vyplývá z mechanismu jejich vzniku, složení pájecí pasty a následně pak přetavovací profil.

Faktory, které ovlivňují vznik makro voidů [6]:

- **pájecí pasta**
 - rozpouštědlo – množství, teplota varu, těkavost
 - natisknuté množství
 - vlastnosti práškové pájky
 - tavidlo – aktivita, množství
- **pájecí profil**
 - vrchol teplotního profilu
 - čas nad teplotou liquidu
 - doba aktivace tavidla
 - strmost profilu
 - užití ochranné atmosféry

- **DPS a součástky**
 - povrchová úprava
 - velikost a design (např. pájecí maska, pokovení, materiál substrátu)
 - obsah oxidů na pájeném povrchu
 - znečištění
- **všeobecné faktory**
 - teplota a vlhkost okolí
 - znečištění během montáže desky

Přítomnost voidů ve spoji může ovlivnit spolehlivost spoje jak negativně, tak v některých případech i pozitivně [8]. Určujícím faktorem je velikost, množství a také umístění voidů ve spoji. Jejich samotná přítomnost ve spoji působí jako koncentrace napětí a díky tomu může dříve začít tvorba trhlin nebo jejich množení, což může vést až k selhání spoje. Nicméně, v některých případech může také void zabránit vzniku trhlin nebo alespoň oddálit dobu jejich vzniku tím, že sníží koncentraci napětí ve spoji. Co se týče umístění ve spoji, voidy nacházející se na rozhraní pájky, jsou pro spolehlivost nebezpečnější, a to z toho důvodu, že zvyšují pravděpodobnost šíření trhlin. Dále přítomnost dutin snižuje aktivní velikost spoje, čímž dochází ke zvýšení jeho odporu, a tím ke změně jeho elektrických vlastností a také schopnosti spoje odvádět nežádoucí teplo, což může být problém u výkonových součástek, které se více zahřívají.

Vliv povrchových úprav na tvorbu voidů

Povrchová úprava mědi se používá jako ochrana před oxidací povrchu, zajištění dlouhodobé skladovatelnosti a také ke zlepšení pájitelnosti povrchu. Metoda těchto úprav má vliv na množství a velikost voidů ve spoji. Mezi nejpoužívanější se řadí – HASL, ENIG, OSP, galvanický cín, galvanické stříbro [1].

Stručný popis povrchových úprav [1]:

- **OSP** – chemická metoda, při které se nanáší organické inhibitory oxidace mědi na odhalený měděný povrch DPS,
- **HASL** – žárově se nanáší vrstva SnPb,

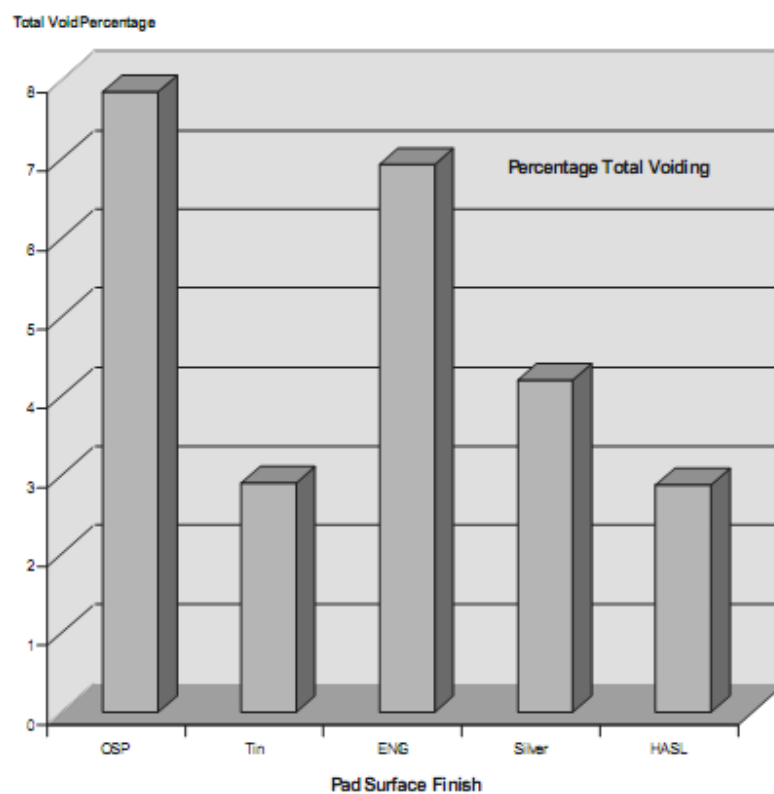
- **ENIG** – chemická nebo galvanická metoda, kdy se nanáší vrstva niklu a poté vrstva zlata na odhalený měděný povrch DPS,
- **galvanický cín** – galvanicky nanesená vrstva cínu na měděný povrch DPS,
- **galvanické stříbro** - nebo galvanicky nanesená vrstva stříbra na měděný povrch DPS.

Tab 5: Porovnání různých typů povrchových úprav [1]

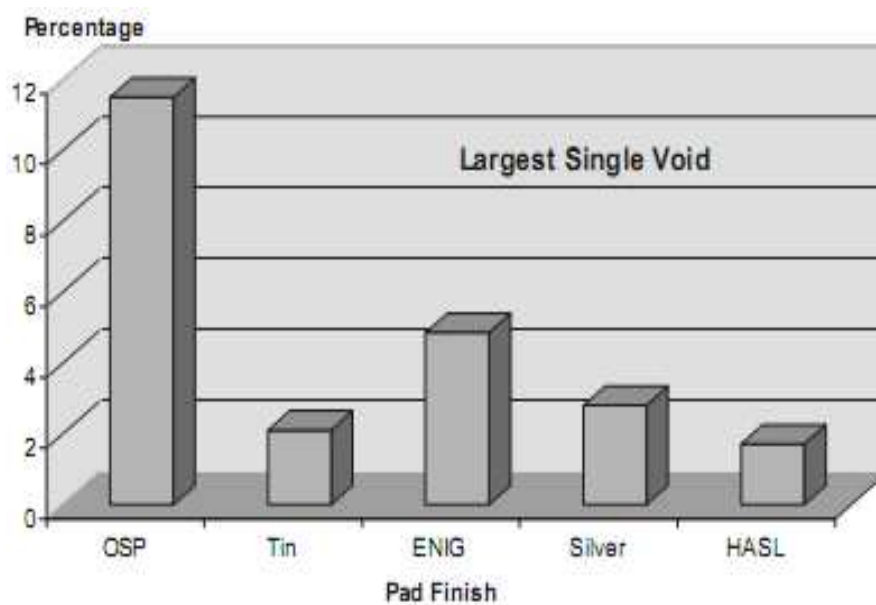
Parametr	HAL	NiAu	OSP	galv. Ag	galv. Sn
Vícenásobný teplotní	ano	ano	problematické	ano	ano
Rovinnost povrchu	ne	ano	ano	ano	ano
Tloušťka vrstvy / μm /	1 - 20	5	0,5	0,16	0,1
Fine Pitch aplikace	problematické	ano	ano	ano	ano
Kontaktování	ne	ano	ne	ne	ne
Teplotní stres nad 65°C	ano	ne	ne	ne	ne
Údržba lázně	obtížná	střední	snadná	snadná	snadná
Řízení procesu	střední	obtížné	snadné	snadné	snadné
Náklady	střední	vysoké	nízké	střední	nízké
Ekologické aspekty	špatné (Pb)	dobré	dobré	dobré	dobré
Bezolovnatá pájka SnAgCu	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje

Při zkoumání vlivu povrchových úprav na vznik a velikost voidů v BGA [7] bylo použito několik desek, které byly vyrobeny a následně skladovány shodným způsobem. Výsledné měření množství a velikosti voidů se provádělo pomocí rentgenové kontroly pájeného spoje a použití příslušného software. Z výsledků vyplývá, že nejhorší povrchovou úpravou, co se týče množství a velikosti voidů, je OSP. Při jejím použití se tvořilo největší množství voidů (Graf 1) i největší voidy (Graf 2). Je to dáno tím, že při OSP úpravě se používají organické látky a tím vzniká více plynů, kterými jsou tvořeny voidy. Dále je z výsledků patrné, že nejlepších výsledků dosáhly metody HASL a galvanický cín. Nutno ovšem podotknout, že všechny testované povrchové úpravy vyhověly normě IPC-A-610D.

Graf 1: Procentuální množství voidů při použití různých povrchových úprav [7]



Graf 2: Procentuální vyjádření největšího voidu při použití různých povrchových úprav [7]



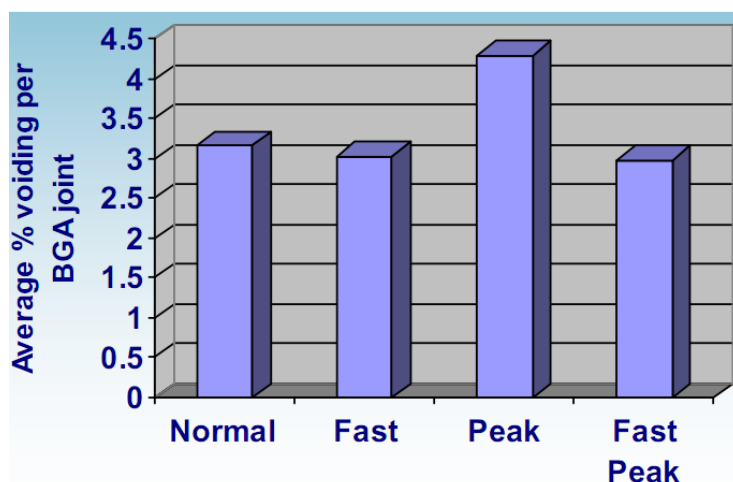
Vliv teplotního profilu

Teplotní profil spolu se složením pájky hraje nejdůležitější roli, co se týče tvorby dutin ve spoji. Ve studii *Voiding: Occurrence and reliability issues with lead-free*, WICKHAM, Martin [9], byly srovnány čtyři nastavení teplotního profilu při pájení BGA spoje, jejichž parametry jsou uvedeny v tabulce (Tab 6). Z výsledků (Graf 3) je vidět, že profil s nevyšší teplotou vytvořil nejvíce dutin, u ostatních nastavení nebyl rozdíl nijak významný.

Tab 6: Nastavení teplotních profilů [9]

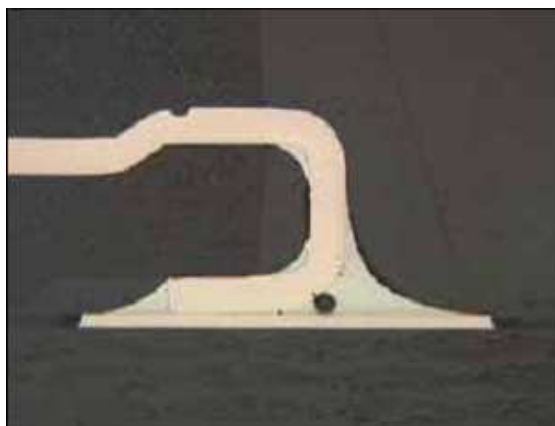
Parametr	Normal	Fast	Peak	FastPeak
Nejvyšší teplota (°C)	224	225	239	239
Maximální strmost (°C/sec)	1.7	2.3	1.7	2.3
Čas nad 217°C (min:sec)	0:29	0:28	1:17	1:12

Graf 3: Procentuální vyjádření výskytu voidů v BGA spoji pro různá nastavení profilu [9]

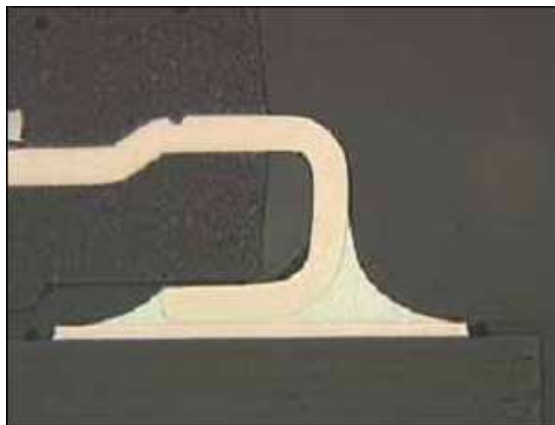


Možností, jak snížit tvorbu voidů, je použití vakuového kondenzačního pájení (pájení v parách) [10]. Pájka v kapalném skupenství se podrobí vakuu, a tím dojde ke snadnějšímu úniku plynů, jež jsou v ní obsaženy. Jedná se o metodu, kdy se osazená deska po přehřevu vystaví toku nasycených par fluorovaných uhlovodíků, které na chladnějších částech desky kondenzují. Uvolňuje se při tom teplo, které ohřívá součástky i DPS. Teplota postupně roste

do doby, kdy dochází k přetavení pájecí pasty. Dále roste až do teploty varu, která musí být vyšší, než je teplota pájení. Tento způsob je obzvláště vhodné používat při pájení výkonových součástek, protože voidy zhoršují schopnost spoje přijímat ztrátové teplo a složitějších DPS s vysokým počtem součástek. Srovnání dvou stejných součástek pájených SAC pájkou je na Obr 3 a Obr 4. Na snímku, kde je spoj pájený pomocí vakuového kondenzačního pájení, je vidět, že se void neobjevil.



Obr 3: SAC pájený spoj s typickým voidem [10]



Obr 4: SAC pájený spoj po vakuovém kondenzačním pájecím procesu [10]

2.2.2 Micro voidy

Tento typ voidů je umístěn na rozhraní pájecí plošky a pájky nad intermetalickou vrstvou, která se vytváří při pájení (Obr. 5). Jsou v průměru menší než 1-2 mils. Počet těchto dutin je vždy vyšší a nachází se všechny v jedné rovině. Protože se jedná o skupinu dutin umístěných v jedné rovině, působí tak na pevnost spoje tím, že urychlují praskání pájky během tepelného nebo mechanického namáhání [11]. Příčina jejich vzniku spočívá v rozdílném difuzním koeficientu materiálu na rozhraní pájka a pájecí ploška. Sousední sloučeniny nebo fáze se mění, objem jedné roste a ostatní se redukuje. Např. měď z povrchu pájecí plošky difunduje do (na cín bohaté) pájky rychleji než je tomu naopak. Kvůli této nevyvážené difuzi mědi do cínu vznikají micro voidy. Bylo také zjištěno, že převládají v případech, kdy základní měděný substrát má hrubou topografii a nadměrnou vrstvu stříbra [12].

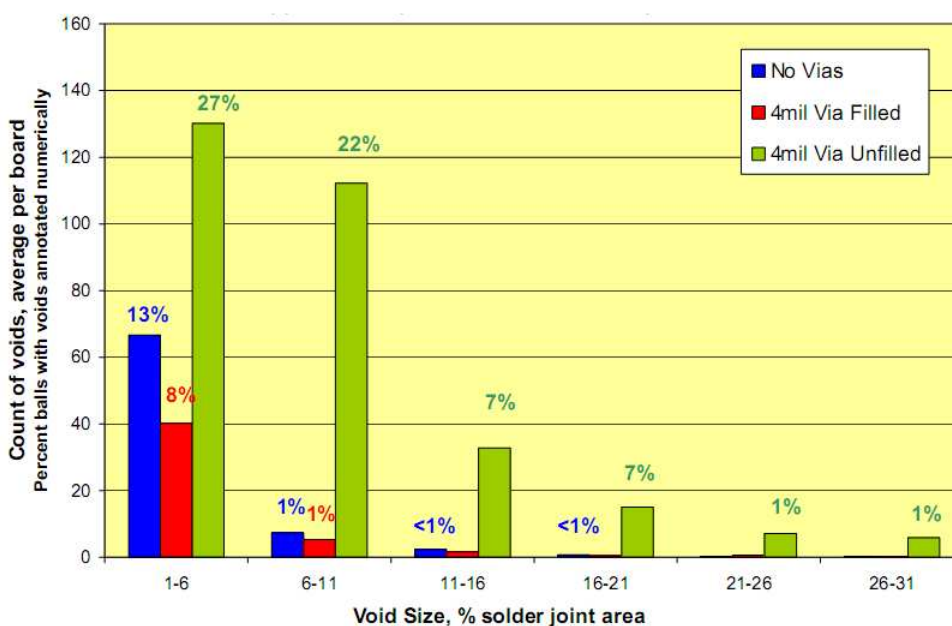


Obr 5: Micro voidy na rozhraní padu a pájky [6]

2.3 Voidy v mikropropojích

Mikropropoje jsou pokovené cesty, jejichž průměr je menší než 150 μm . Využívají se pro zmenšení rozměrů desky a snížení hmotnosti i počtu vrstev desky. Problémem je, že se ve spojení BGA a mikropropojů tvoří velké množství voidů. Ty vznikají tím, že pájka nesmočí měděný povrch uvnitř cesty, čímž vznikne vzduchová bublina. Z výsledků studie [13], ve které byly porovnávány bezolovnaté spoje s vyplněnými a nevyplněnými mikropropoji a spoje bez mikropropojů, vyplývá, že nejméně voidů se tvoří u vyplněných mikropropojů. Velkou roli zde hraje velikost mikropropoje (Graf 4).

Graf 4: Srovnání výskytu voidů u bezolovnaté pájky při použití microvia [13]

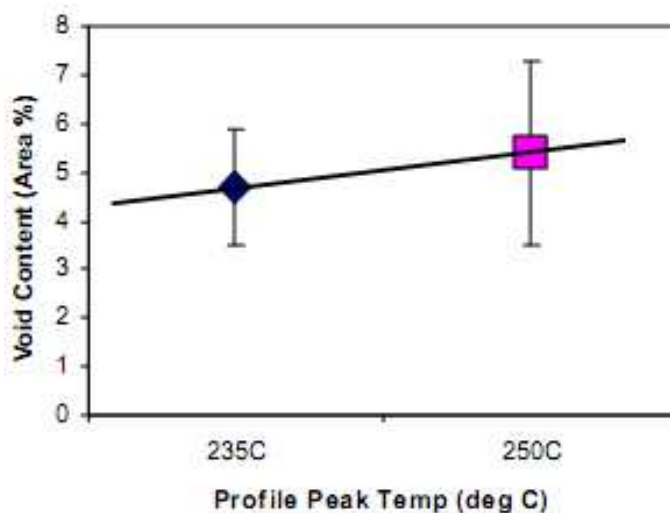


2.3.1 Vliv teplotního profilu

Teplotní profil je jednou z možností, jak zmírnit vznik voidů ve spoji s mikropropoji [14]. Stejně jako v případě makro voidů zde má vliv maximální teplota a strmost profilu. Vyšší teplota zvyšuje přítomnost voidů ve spoji (Graf 5). Pro porovnání zde byly použity dva stejné profily s různou maximální teplotou (235°C a 250°C). Menší výskyt je dán tím, že při

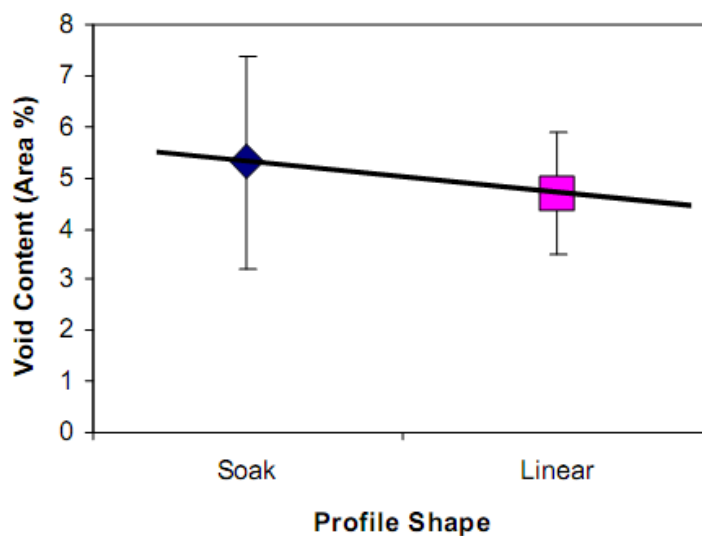
vyšší teplotě se tavidlo vysouší rychleji a zvyšuje se tak viskozita a bude tak větší šance, že uvnitř pájky zůstane uzavřen plyn.

Graf 5: Vliv teplotního profilu na tvorbu voidů [14]



Další vlastností profilu, která ovlivňuje tvorbu voidů, je tvar profilu. Byly porovnávány dvě nastavení teplotního profilu s odlišným průběhem, ale stejnou maximální teplotou. Jeden profil měl lineární průběh, druhý obsahuje fázi, kdy je teplota určitý čas konstantní. Lineární profil vytvořil o několik desetin procent voidů méně (Graf 6).

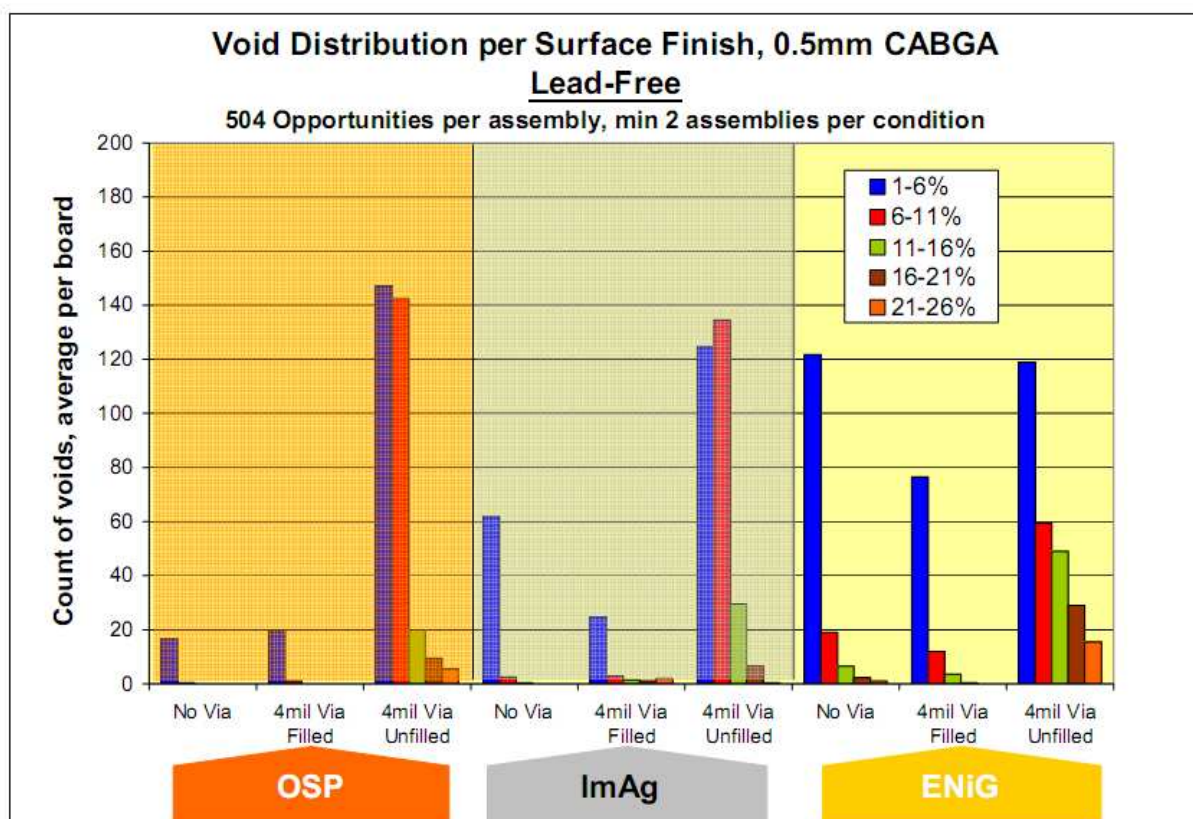
Graf 6: Vliv tvaru teplotního profilu na tvorbu voidů [14]



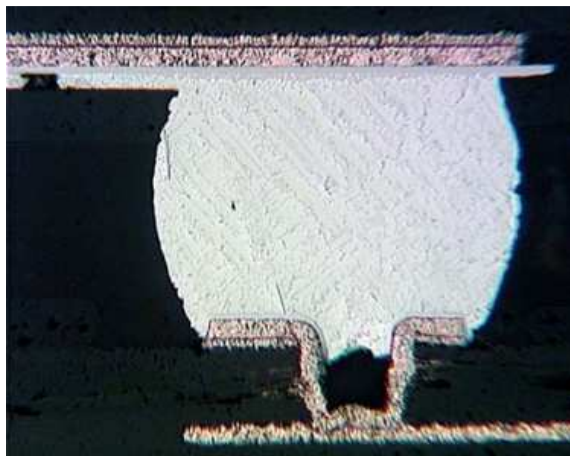
2.3.2 Vliv povrchových úprav

Povrchové úpravy mají v případě BGA spojů s mikropropoji vliv podobně jako u makro voidů, ale s rozdílnými výsledky. Zatímco u makro voidů bylo jednoznačně nejhorší povrchovou úpravou OSP, u voidů v mikropropojích to není tak jednoznačné. Zde, pokud se jednalo o vyplněný mikropropoj, mělo OSP nejlepší výsledky (Graf 7). U nevyplněné cesty byla nejhorší ENIG úprava, protože bylo zaznamenáno zvýšené tvoření velkých voidů na desce.

Graf 7: Vliv povrchových úprav [13]

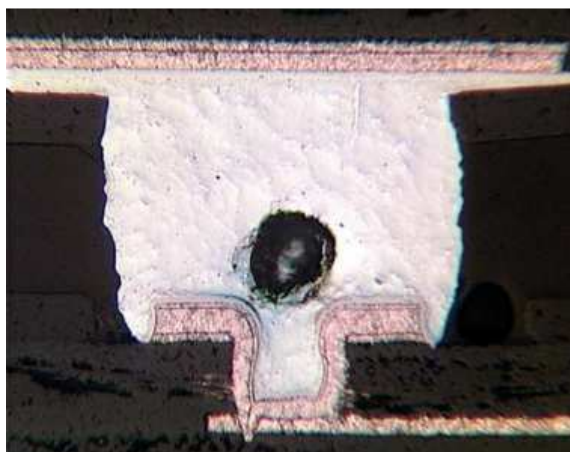


Dále bylo pozorováno, že v testovaných BGA spojkách při použití OSP povrchové úpravy s nevyplněným mikropropojem se voidy vyskytovaly spíše v cestě (Obr 6). Je to dáno tím, že SAC pájka se hůře roztéká na mědi [13].



Obr 6: BGA spoj s nevyplněnou mikropropojem při užití OSP povrchové úpravy [13]

Podobné výsledky se objevily i při použití ENIG povrchové úpravy. Rozdíl byl v tom, že void byl vždy umístěn na vrcholu cesty (Obr 7), což je dáno tím, že se SAC pájka zlatě lépe roztéká a může tak zaplnit cestu, ale void se pouze přesune [13].



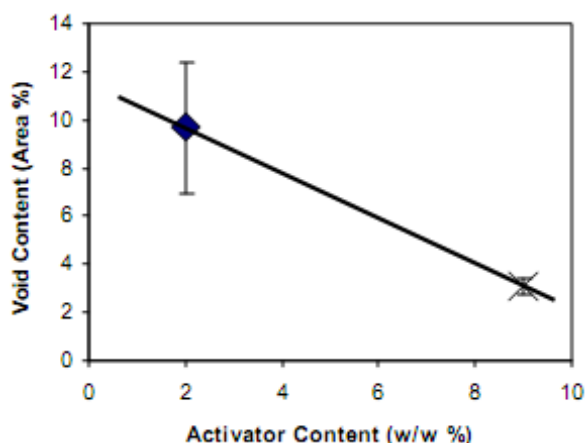
Obr 7: BGA spoj s nevyplněným mikropropojem při použití ENIG povrchové úpravy [13]

2.3.3 Další vlivy

Mezi další zkoumané vlivy ve studii [14] patří složení pájecí pasty, které zahrnovalo, a počet nátisků pájecí pasty na DPS, většina těchto faktorů výrazně ovlivnila vytvořený počet voidů ve spoji.

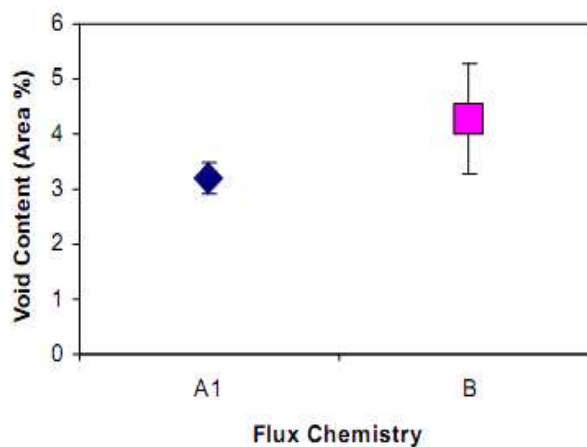
- **aktivita tavidla** – tavidlo s větším množstvím aktivátorů (větší aktivitou; Graf 8, pravý bod) tvoří méně voidů než tavidlo s menším množstvím aktivátorů (menší aktivitou). Je to proto, že tavidlo s větší aktivitou může vyčistit oxidy v pájce rychleji, je tedy menší šance na jejich zachycení ve spoji.

Graf 8: Vliv aktivity tavidla na tvorbu voidů [14]



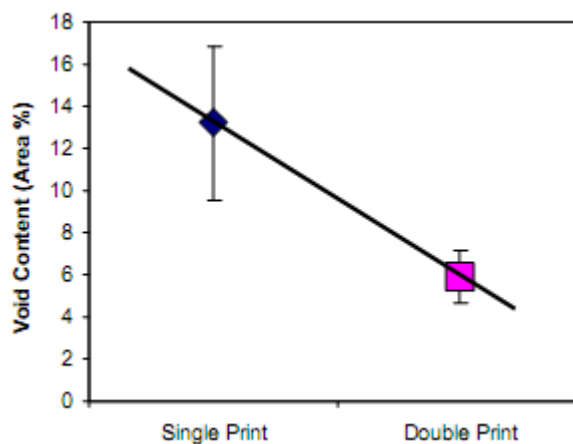
- **složení tavidla** – složení tavidla může mít velkou roli ohledně tvorby dutin, ale vzhledem k tomu, že se jedná o soubor několika vlastností dohromady (aktivita tavidla, bod varu rozpouštědla, rozpustnost, viskozita atd.), je složité vliv prozkoumat. Zde bylo porovnáváno různé složení tavidla (Graf 9), ale bez bližšího popisu vlastností. Výsledkem bylo rozdílné množství tvorby voidů.

Graf 9: Vliv složení tavidla na tvorbu voidů [14]



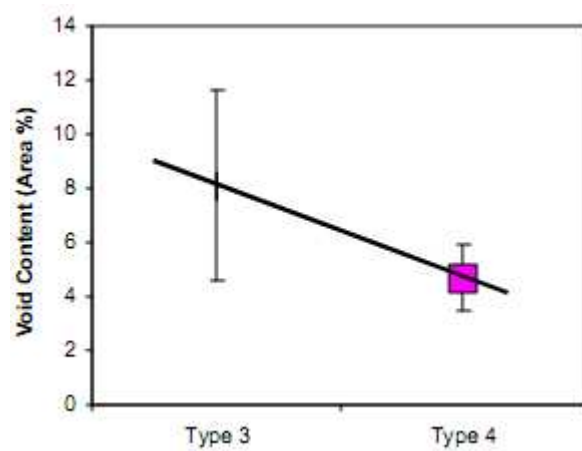
- **počet tisků pasty** – zopakováním procedury tisku pájecí pasty lze výrazně snížit tvorbu voidů. Je to proto, že další nátisk zajistí dokonalejší naplnění cesty. Při použití jednoho nátisku se může stát, že pájka dostatečně nezaplňuje cestu. Při přetavení se pak pájka nerozteče po celé cestě a zůstane zde vzduchová bublina.

Graf 10: Vliv počtu tisků na tvorbu voidů [14]



- **velikost částic pájkového prášku** – ukázalo se, že pájka s většími částicemi tvoří méně voidů (Graf 10), což je překvapivé, protože by se dalo očekávat, že jemnější prach zaplní mikropropoj lépe.

Graf 11: Vliv velikosti částic pájkového prášku [14]



3 Praktická část

3.1 Výroba desky a vzorků

Prvním úkolem praktické části bylo vytvoření testovacích desek. Testovací obrazec byl zvolen co nejjednodušší s ohledem na snadnou výrobu, na co možná nejnížší náklady a také na to, že se voidy nejvíce tvoří při větší ploše pájecí plošky, nebyly tedy použity žádné povrchové úpravy. Obrazec je tedy tvořen maticí 4x4 plošky o rozměrech 4x4 mm (1 ploška=1 vzorek).

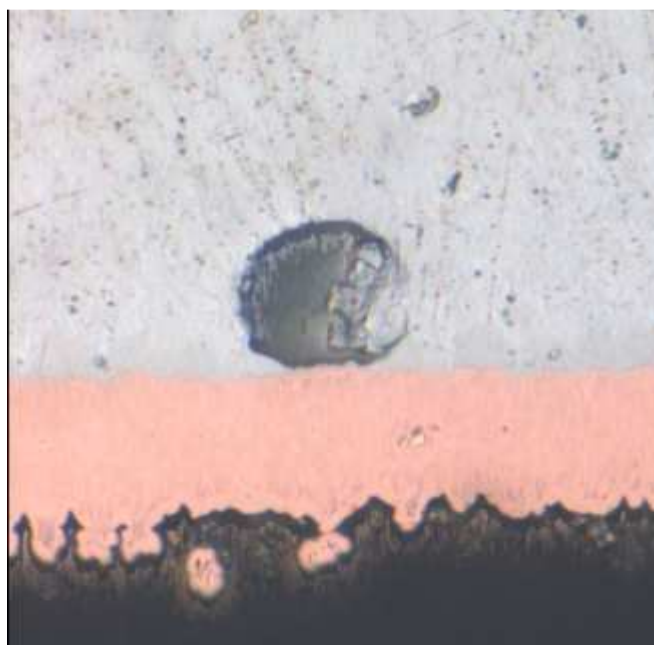
Postup výroby desek je následující:

- **laminace** – provádí se při žlutém světle, aby nedošlo k nežádoucímu osvětlení a v co nejméně prašném prostředí na očištěnou desku, hlavní parametry tohoto procesu jsou: teplota předehřevu a laminačního procesu, rychlost posuvu a přítlak
- **expozice** – přenesení obrazu pájecích plošek na fotorezist nalamínovaný na desce pomocí ultrafialového záření, byl použit negativní fotorezist, tzn. že působením záření naexponované části zpolymerují a kryjí
- **vyvolání** – vyvolání se provádělo v roztoku s uhličitanem sodným
- **leptání** – probíhalo v roztoku $\text{HCL} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{voda}$, kde každá složka byla zastoupena jednou třetinou
- **stripování** – slouží k odstranění fotorezistu a prováděno bylo v hydroxidu draselném
- **tisk pasty** – byl použit šablonový tisk (šablona viz obr.), pájecí pasta byla použita pasta od firmy Senju typ SAC305
- **přetavení** – přetavení bylo provedeno v in-line přetavovací peci, teplotní profil viz. příloha

Z vyrobené desky byla většina vzorků podrobena analýze pomocí rentgenu, následně teplotnímu namáhání, několik jich bylo ponecháno na výrobu mikrovýbrusů.

3.2 Mikrovýbrusy

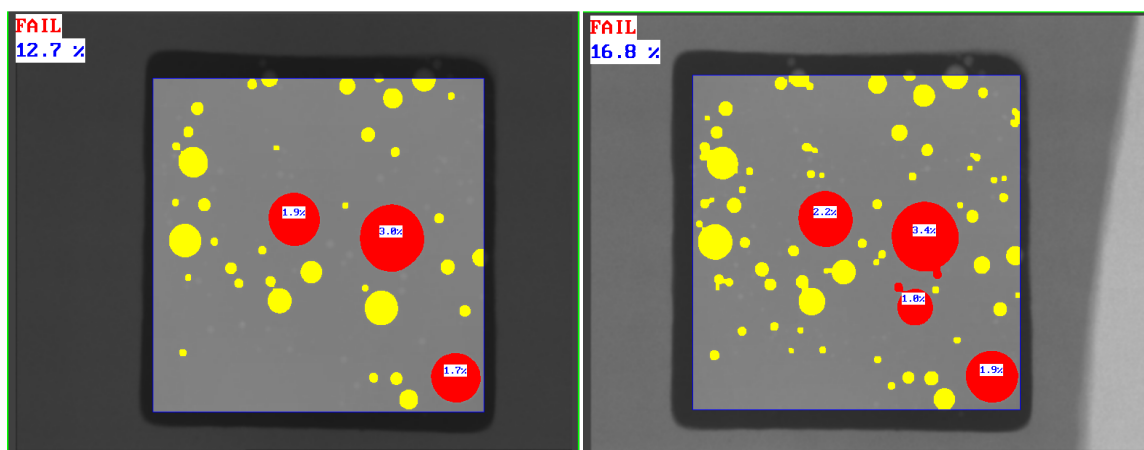
Mikrovýbrusy byly vyrobeny pro pořízení snímků voidů optickým mikroskopem, dále také ke sledování intermetalických vrstev a vlivu leptání na strukturu pájeného spoje. Výroba vzorku pro mikrovýbrus spočívá v zalití skupiny plošek do dentakrylu, což je metylmetakrylátová licí pryskyřice, která se skládá z práškové a tekuté formy. Po smíchání těchto dvou složek na požadovanou konzistenci, dochází zhruba po 4 až 5 hodinách při pokojové teplotě k vytvrzení. Samotný mikrovýbrus se provádí mechanickým broušením za mokra na kotoučových bruskách, kde je plocha vzorku opracovávána brusným papírem za stálého přítoku vody. Brusné papíry měly zrnitost 160, 600, 1000 a 2000. Tento údaj udává počet ok síta na čtvereční palec, přes které bylo brusivo tříděno. V případě dostačujícího obroušení následuje leštění vzorku, které odstraňuje zbylé nerovnosti po broušení. K leštění byl použit leštící kotouč potažený sametem v kombinaci s diamantovou pastou D3 a D07 od firmy Urdiamant. Vyleštěný vzorek byl prozkoumán na optickém mikroskopu, ze kterého byly pořízeny snímky voidů (obr.).



Obr 8: Snímek voidu pořízený optickým mikroskopem

3.3 Teplotní namáhání

Hlavním úkolem praktické části bylo teplotní namáhání vytvořených vzorků a následná analýza získaných výsledků. Vzorky, které nebyly použity pro tvorbu mikrovýbrusů, byly rozděleny po řadách do čtyř skupin, tzn. že v každé skupině byly čtyři zapájené plošky. Od každé řady byl pořízen snímek pomocí rentgenu a následně pomocí příslušného software pro vyhodnocování přítomnosti dutin ve spoji byla zjištěna celková plocha, kterou zabírají vytvořené voidy. Mezi další informace, které software vyhodnocoval, patřila velikost pěti největších voidů, dále také jestli procento voidů nepřesáhlo námi určenou mez.



Obr 9: Snímky z rentgenové kontroly, vlevo před stárnutím, vpravo po stárnutí

Teplotní namáhání probíhalo v peci při teplotě 150°C po danou dobu. Tato doba byla stanovena u vzorku 1 na 120, vzorku 2 na 192, vzorku 3 na 288 a vzorku 4 na 360 hodin. Po proběhnutí tohoto namáhání se opět provedla stejná analýza jako před namáháním. Očekávané výsledky byly takové, že čím déle probíhá teplotní namáhání, tím více se voidy zvětší. Výsledky analýz jednotlivých vzorků jsou zobrazeny v tabulce (Tab 7), zvětšení je počítáno jako rozdíl hodnot před namáháním a po namáháním, kde hodnota před namáháním je brána jako 100%. Zprůměrované hodnoty po cyklech jsou uvedeny v další tabulce (Tab 8), tyto hodnoty jsou také vyneseny do grafu (Graf 12). Z něj je patrné, že délka namáhání nemá podstatný vliv na zvětšení voidů. Proto bylo následně provedeno krátkodobé namáhání.

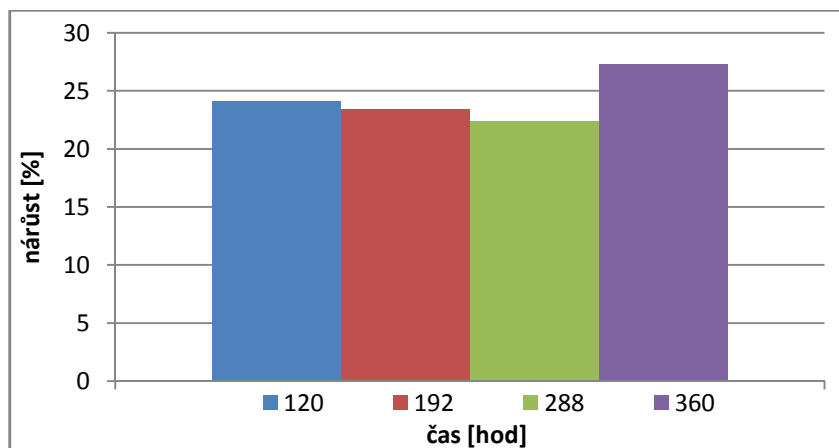
Tab 7: Procentuální množství z celkové plochy spoje před a po stárnutí

číslo vzorku	před namáháním [%]	čas namáhání [hod]	po namáhání [%]	rozdíl [%]	zvětšení [%]
1	11,8	120	13,6	1,8	15,3
2	10,1		13,3	3,2	31,7
3	10,1		12,7	2,6	25,7
4	12,7		15,7	3	23,6
5	12,7	192	16,8	4,1	32,3
6	15,9		19,2	3,3	20,8
7	13,1		15,8	2,7	20,6
8	14		16,8	2,8	20,0
9	14,4	288	17,5	3,1	21,5
10	8,1		9,9	1,8	22,2
11	13,9		17,8	3,9	28,1
12	17,9		21,1	3,2	17,9
13	19,4	360	24,6	5,2	26,8
14	6,6		9	2,4	36,4
15	6,8		8,6	1,8	26,5
16	11,8		14,1	2,3	19,5

Tab 8: Průměrné hodnoty zvětšení v cyklu

čas namáhání [hod]	průměr zvětšení [%]
120	24,1
192	23,4
288	22,4
360	27,3

Graf 12: Průměrné zvětšení jednotlivých cyklů dlouhodobého namáhání

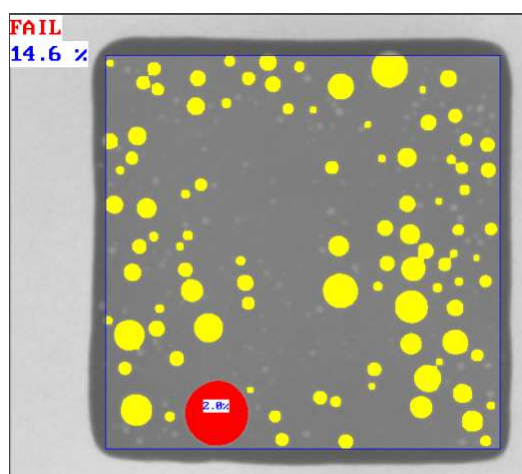
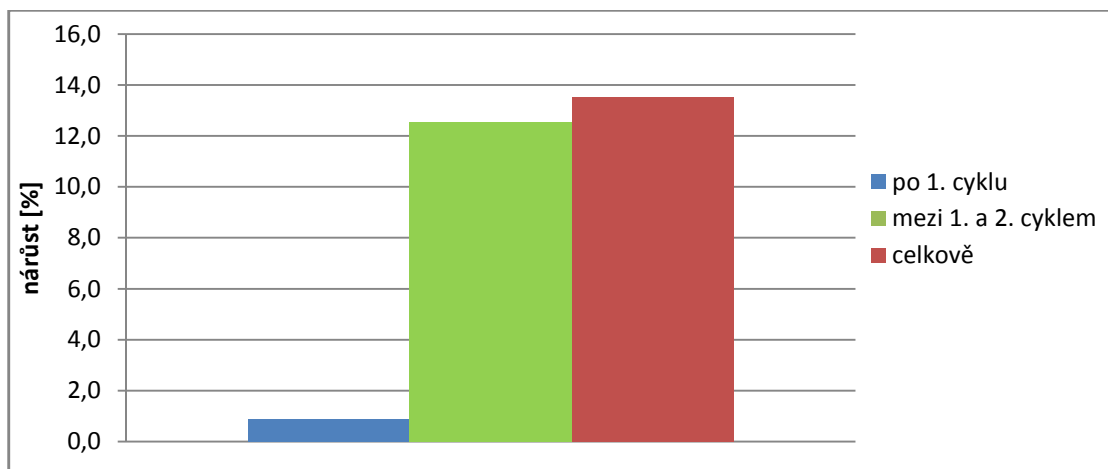


Při krátkodobém teplotním namáhání byla použita opět pasta od firmy Senju SAC 305. Namáhání probíhalo ve dvou cyklech, které měli trvání 20 minut při teplotě 150°C. Opět byly pořízeny rentgenové snímky před a po obou cyklech s vyhodnocením příslušného softwaru. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce (Tab 9). Část vzorků byla vyřazena, protože u nich nebyla správně vybrána měřená plocha a zkreslovaly by tak výsledek měření. Zvětšení je počítáno stejně jako v předchozím případě. Zprůměrované hodnoty ukazují, že během prvního cyklu nedošlo k výraznému navýšení objemu voidů ve spoji. To se projevuje až po proběhnutí druhého cyklu, kdy je nárůst mnohonásobně vyšší než po prvním, viz Graf 13.

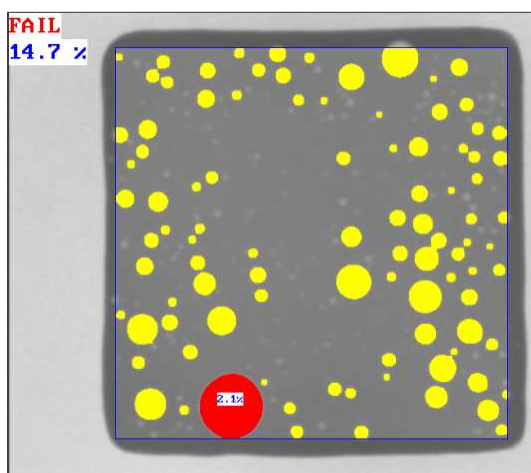
Tab 9: Výsledky krátkodobého namáhání

vzorek	před namáháním [%]	po 1. namáhání [%]	zvětšení [%]	po 2. namáhání [%]	zvětšení od 1. ke 2. namáhání [%]	celkové zvětšení [%]
1	14,6	14,7	0,7	17,1	16,3	17,1
2	13,8	13,9	0,7	15,7	13,0	13,8
3	12,8	12,8	0,0	14,6	14,1	14,1
4	27,0	27,2	0,7	30,2	11,0	11,9
5	13,0	13,3	2,3	14,4	8,3	10,8
průměr			0,9		12,5	13,5

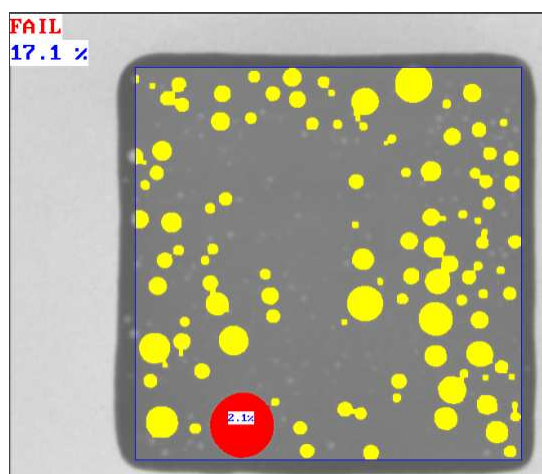
Graf 13: Průměrné zvětšení po cyklech krátkodobého namáhání



Obr 10: Snímek z rentgenové kontroly před namáháním



Obr 11: Snímek z rentgenové kontroly po prvním cyklu



Obr 12: Snímek z rentgenové kontroly po druhém cyklu

4 Závěr

Úkolem teoretické části bylo vyhledat dostupné informace ohledně problematiky tvoření voidů v bezolovnatém pájeném spoji. Z prozkoumaných zdrojů byly získány informace o typech voidů, jejich vzniku a vlivech, které ovlivňují jejich vzniklé množství. Z vlivů, které působí na jejich tvorbu, má nejvýznamnější vliv tavidlo, povrchová úprava DPS a použitý přetavovací profil.

U tavidla má největší vliv na tvorbu voidů nejspíše aktivita tavidla. Tavidlo s více aktivátory má výrazně méně voidů než tavidlo s méně aktivátory. Je to dáno tím, že aktivnější tavidlo rychleji vyčistí oxidy v pájce, které pak mají menší pravděpodobnost, že zůstanou uchyceny v pájce a vytvoří tak void.

Z povrchových úprav je, z hlediska výskytu voidů ve spoji, nejlepší galvanické stříbro, naopak největší množství voidů se tvořilo u OSP povrchové úpravy. Toto platí, pokud není použita technologie mikropropojů. V tom případě nejsou výsledky jednoznačné, z porovnávaných úprav bylo nejhorší ENIG.

Co se týče teplotního profilu, ten podle výsledků nemá až tak významný vliv. Je ale také nutno podotknout, že komplexní test vlivu teplotního profilu by byl poněkud složitější na provedení. Nicméně bylo dokázáno, že vyšší maximální teplota profilu způsobuje větší tvorbu voidu a také, že tvar profilu má také určitou souvislost s výskytem voidů ve spoji.

Praktická část se zabývala tvorbou vlastních zkušebních vzorků, která v sobě zahrnuje celý technologický postup výroby testovací desky. Některé vzorky byly použity pro vytvoření mikrovýbrusů, které sloužily pro zkoumání optickým mikroskopem. Většina vzorků sloužila k prozkoumání teplotního namáhání.

Teplotní namáhání probíhalo při teplotě 150°C po dobu 120, 192, 288 a 360 hodin a sloužilo k ověření jeho vlivu na postupný nárůst voidů v pájeném spoji. Z výsledků vyplynulo, že dlouhodobější namáhání nejspíše nemá výrazný vliv na zvětšování voidů a k nárůstu voidů tedy dochází již na počátku namáhání, což dokázalo druhé teplotní namáhání.

To trvalo podstatně kratší dobu a bylo rozděleno na dva cykly, které probíhaly 20 minut při teplotě 150°C. Předpokladem bylo, že k výraznému zvětšení bude docházet již při prvním cyklu. Výsledky však ukázaly, že při něm je zvětšení v průměru kolem 1%. K výraznému zvětšení dochází až při druhém cyklu, kdy je nárůst několikanásobně větší oproti 1 cyklu.

5 Přehled použité literatury

- [1] STARÝ, ŠANDERA, KAHLE *Plošné spoje a povrchová montáž. Skriptum VUT.* VUT Brno, 1999. ISBN 80-214-1499-5.
- [2] SZENDIUCH *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů, VUTium.* VUTium Brno, 2006. ISBN 80-214-3292-6.
- [3] TOLENO, Brian *Pb-free Solder Paste Formulation Affect on Voiding in Reflowed Assemblies*, 26 stran, dostupné z http://www.emsnow.com/cnt/files/White%20Papers/Henkel_EffectoLeadfree_Voiding.pdf
- [4] HILL, Mike a kol. *IPC-A-610*, Revize C. Northbrook, Illinois: IPC, 2000. 420 s. ISBN 1-580982-32-8.
- [5] IPC-7095 Design and Assembly Process Implementation for BGAs, 2000, 88 stran, dostupné z <http://bdtic.blog.dianyuan.com/u/61/1200480914.pdf>
- [6] ASPANDIAR, Raiyo, *Voids in Solder Joints*, 42 stran, dostupné z http://www.smta.org/files/oregon_chapter_presentation0905.pdf
- [7] BERNARD, David; BRYANT, Keith, *DOES PCB PAD FINISH AFFECT VOIDING LEVELS IN LEAD-FREE ASSEMBLIES?*, 5 stran, dostupné z http://www.dage.de/download/semi/papers/pad_finish_paper_smta_2004.pdf
- [8] YUNUS, Mohammad; SHIRARY, K.; PITARRESI, J.M., *Effect of voids on the reliability of BGA/CSP solder joints*, 2003, 10 stran, dostupné z <http://www.atv-tech.com/en/pdf/Effects%20of%20voids%20on%20the%20reliability%20of%20BGA%20and%20CSP%20solder%20joints.pdf>

- [9] WICKHAM, Martin, *Voiding: Occurrence and reliability issues with lead-free*, Indium Corporation of America, 7 stran, dostupné z <http://www.leadfreemagazine.com/pages/pdf/voiding.pdf>
- [10] ANLAGENBAU, Rehm, *Vacuum Condensation Soldering, A New Reflow Process*, 2 strany dostupné z <http://www.wisemedia.it/ob/ob/postnuke/pdf/giugno/060308.pdf>
- [11] YAU, Yung-Herng; WENGENROTH, Karl; ABYZ, Joseph, *A study of planar microvoiding in Pb-free solder joints*, 14 stran dostupné z <http://www.enthone.com/docs/IPCEXpoAPEX2007EnthoneMicrovoids.pdf>
- [12] *Microvoid resistant immersion silver for lead-free assembly processing*, AlphaStar, 4 strany, dostupné z <http://www.enthone.com/docs/AlphaSTARMicrovoidsBro.pdf>
- [13] SHEA Chrys; CHU Quyen; WANG Paul, Ph.D, *BGA SOLDER VOID CORRELATION TO VIA-IN-PAD, VIA FILL, SURFACE FINISH, AND LEAD-FREE SOLDER – A PRELIMINARY REVIEW, PART THREE*, 15 stran, dostupné z <http://members.ipc.org/ipclogin/ipcmembers/IPC/Route/1006/tech1.pdf>
- [14] JO Hyoryoon; NIEMAN E. Benjamin; LEE Ning-Cheng, *Voiding of Lead-Free Soldering at Microvia*, 7 stran, dostupné z <http://www.indium.com/pbfree/documents/techpapers/Voiding.pdf>

6 Seznam obrázků

Obr 1: Snímek příčného řezu BGA spoje, který odhaluje přítomnost voidu ve spoji [6]	15
Obr 2: Kontrola pájených spojů rentgenem [7]	15
Obr 3: SAC pájený spoj s typickým voidem [10]	21
Obr 4: SAC pájený spoj po vakuovém kondenzačním pájecím procesu [10]	21
Obr 5: Micro voidy na rozhraní padu a pájky [6]	22
Obr 6: BGA spoj s nevyplněnou mikropropojem při užití OSP povrchové úpravy [13]	26
Obr 7: BGA spoj s nevyplněným mikropropojem při použití ENIG povrchové úpravy [13] ..	26
Obr 8: Snímek voidu pořízený optickým mikroskopem	32
Obr 9: Snímky z rentgenové kontroly, vlevo před stárnutím, vpravo po stárnutí	33
Obr 10: Snímek z rentgenové kontroly před namáháním	36
Obr 11: Snímek z rentgenové kontroly po prvním cyklu	36
Obr 12: Snímek z rentgenové kontroly po druhém cyklu	37

7 Seznam tabulek

Tab 1: Slitiny pod 180°C [1]:	12
Tab 2: Slitiny 180 – 200°C [1]:	12
Tab 3: Slitiny 200 – 230°C [1]	12
Tab 4: Kritéria pro voidy v BGA kuličce [5]:	14
Tab 5: Porovnání různých typů povrchových úprav [1]	18
Tab 6: Nastavení teplotních profilů [9]	20
Tab 7: Procentuální množství z celkové plochy spoje před a po stárnutí	34
Tab 8: Průměrné hodnoty zvětšení v cyklu	34
Tab 9: Výsledky krátkodobého namáhání	35

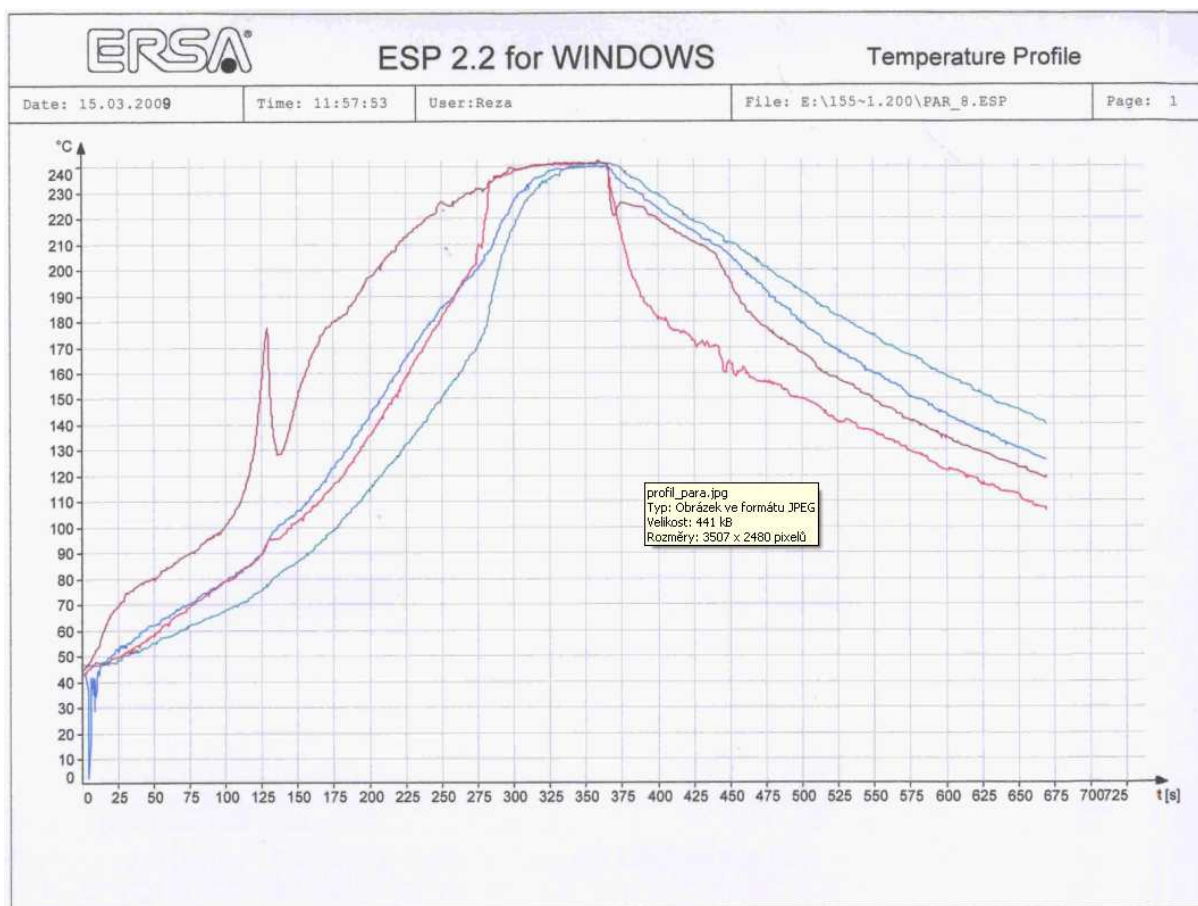
8 Seznam grafů

Graf 1: Procentuální množství voidů při použití různých povrchových úprav [7].....	19
Graf 2: Procentuální vyjádření největšího voidu při použití různých povrchových úprav [7].	19
Graf 3: Procentuální vyjádření výskytu voidů v BGA spoji pro různá nastavení profilu [9] ..	20
Graf 4: Srovnání výskytu voidů u bezolovnaté pájky při použití microvia [13].....	23
Graf 5: Vliv teplotního profilu na tvorbu voidů [14].....	24
Graf 6: Vliv tvaru teplotního profilu na tvorbu voidů [14]	24
Graf 7: Vliv povrchových úprav [13].....	25
Graf 8: Vliv aktivity tavidla na tvorbu voidů [14].....	27
Graf 9: Vliv složení tavidla na tvorbu voidů [14]	28
Graf 10: Vliv počtu tisků na tvorbu voidů [14].....	28
Graf 11: Vliv velikosti částic pájkového prášku [14].....	29
Graf 12: Průměrné zvětšení jednotlivých cyklů dlouhodobého namáhání.....	35
Graf 13: Průměrné zvětšení po cyklech krátkodobého namáhání	36

9 Seznam příloh

Příloha A	Pájecí profil
Příloha B	Motiv šablony

Příloha A Pájecí profil



Příloha B motiv šablony

